

学校编码: 10384

分类号_____密级

学号: 19920071151181

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

脉宽调制直流升压变换器 IC 设计研究

Design and Research of PWM DC-DC Convertor

张春红

指导教师姓名: 冯勇建 教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2010 年 5 月

论文答辩时间: 2010 年 6 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

论文针对便携式电子产品电源功耗过大而降低了电池寿命的问题,设计了一款高带载能力、高效率的电流模脉宽调制模式的升压型 **DC-DC** 转换器控制芯片。通过采用可提高带载能力的分段线性斜波补偿技术,解决了传统开关 **DC-DC** 转换器在 **PWM** 信号占空比大于 **50%** 时的斜波补偿导致芯片带载能力下降的缺陷;同时,芯片提出了新颖的峰值电流检测电路,有效减小了芯片面积,提高芯片的转换效率。

针对 **Boost** 转换器芯片的低功耗要求,论文设计了 **Boost** 转换器电路的系统架构,在电压反馈环路中采用插入零极点的方法达到补偿目的,提高了系统稳定性;为了提高因斜波补偿而导致芯片带载能力的下降,在 **PWM** 信号占空比为 **40%** 时开始加入随占空比变化的分段补偿电流,有效提高了带载能力;芯片集成了只检测功率开关导通时电感电流的片上峰值电流检测电路,减少了开关关断时的功耗,可提高系统效率;为了确保系统更加安全和稳定,芯片集成了过压保护、过温保护等多种保护电路;计算选择了芯片应用的外围电子器件参数;在电路设计过程中,采用 **Top-Down** 的设计流程和方法。

论文对系统中给出的主要子电路模块进行了电路原理分析与结构设计,并在此基础上,运用 **EDA** 软件 **HSPICE** 对每个功能模块的各项指标、参数进行了仿真、分析;最后,进行了整体电路的功能和典型性能参数的联合仿真,仿真结果显示满足设计要求。综合考虑器件成本和性能的要求,采用韩国现代公司 **MC5V/20V_0.5um_BCDMOS** 工艺对芯片进行了版图设计。在流片封装后对芯片各项性能参数进行机台测试,测试表明各项参数达到预期指标;在结合实际应用的用中,各项参数均达到应用要求,芯片设计达到了预定的设计目标。

关键词: 电源管理; 电流模式; **PWM**

ABSTRACT

The thesis presents a high loading capability and high efficiency current mode pulse width modulation Boost DC-DC converter which aimed to improve the operational life of portable electronic products. The thesis proposed a segment liner slope compensation which can increase the convertor's loading capability that decreased by conventional DC-DC convertor's slope compensation when its Duty-cycle is larger than 50%. Meanwhile, a novel peak current sense circuit was adopted which can decrease the chip's die size and improve its efficiency.

In this thesis, the whole chip structure of boost DC-DC convertor is laid out and analyzed according to the device's low power cost requirement; to improve the stability of the voltage feedback loop, the convertor introduced zero and pole to compensate the transfer loop. To increase the loading capability which was reduced by slope compensation, a segment compensation slope current which increased with the PWM signal's duty-cycle begin to introduced when duty-cycle is 40%.The chip integrated an on chip current sense circuit which would sense the inductor's current only in the power switch's on mode so that the power consumption can be reduced for the switch's off mode. The chip integrated with over voltage protection circuits, over temperature protection circuit and other protection circuits to make the system more reliable and stable. The periphery components' parameter is determined as well. The chip takes Top-down method as its design flow.

In this thesis, the sub-block circuits' designing principle and architecture of the system are explained and analyzed, based on this, all the electrical characteristics and some important parameters are validated by the simulation results of the EDA(Electronic Design Automatic)software HSPICE. Finally, the performance of the whole chip is simulated combined with some representative parameters. The results match the requirements of the design. Considering the cost and performance requirements of the device, the layout design of the chip was accomplished buy

HD's MC 5V/20V _0.5um_BCDMOS process. The device's evaluation is done after its manufactory, and the results can meet the design spec, the device can also achieve the application requirements, so the chip accomplished the design target.

Keyword: Power Management ; Current Mode; PWM

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 现代集成电路的发展	1
1.2 电源管理 I C 的发展	2
1.3 本文的研究背景和意义	5
1.4 本课题的主要工作介绍	6
第二章 开关电源基础	7
2.1 开关电源的基本结构	7
2.2 开关电源的参数特性	13
2.3 工作模式	15
2.4 BOOST dc-dc 变换器的调制模式	19
第三章 PWM BOOST DC-DC 变换器的系统结构.....	24
3.1 系统工作原理	25
3.2 Boost 变换器输出 LC 参数	27
第四章 BOOST 变换器的分立模块设计	29
4.1 带隙基准源模块	29
4.1.1 带隙基准基本原理	29
4.1.2 带隙基准仿真	32
4.2 电流偏置模块	36
4.3 比较器	40
4.4 误差放大器	44
4.5 斜波补偿	47
4.5.1 斜波补偿原理	47
4.5.2 分段线性斜坡补偿电路的实现	51
4.5.3 斜波补偿电路的仿真和验证	52
4.6 时钟和斜波发生器	53
4.6.1 时钟和斜波发生器原理及设计	53
4.6.2 时钟和斜波发生器的仿真验证	55

4.7 峰值电流检测电路	57
4.7.1 峰值电流检测电路原理	57
4.7.2 峰值电流检测电路的仿真验证	59
4.8 软启动电路	61
4.9 PWM 控制逻辑电路	64
4.10 芯片整体仿真	66
4.10.1 重负载应用输出仿真	67
4.10.2 轻负载应用比仿真	70
4.10.3 瞬态响应仿真	72
第五章 工艺版图封装及测试	75
5.1 晶圆工艺的确定	75
5.2 封装型号的确定	76
5.3 芯片的版图设计	77
5.3.1 版图中各层次的式样定义	77
5.3.2 芯片的总体版图:	78
5.4 芯片的测试	78
5.4.1 测试结果	81
结论.....	87
参考文献	88
攻读硕士学位期间发表的论文	92
致谢.....	93

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1Modern IC Development.....	1
1.2Power Management IC Development	2
1.3The Research Background	5
1.4The Main Work of The Thesis	6
Chapter2 The Bisic Knowledge of Switch Power	7
2.1The Architecture of Switch Power.....	7
2.2 Switch Power Parameter	13
2.3Work Mode	15
2.4 BOOST dc-dc Mondulation Mode	19
Chapter3 PWM BOOST DC-DC Convertor System	24
3.1The Principle of The System	25
3.2 Boost Convertor Output LC	27
Chapter 4 BOOST Subcircuits Design.....	29
4.1Band-gap Block	29
4.1.1The Principle of Bandgap.....	29
4.1.2The simulation Results of Bandgap.....	32
4.2Current Bias Block	36
4.3Comparator	40
4.4Error AMP.....	44
4.5Slope Compensation.....	47
4.5.1The Principle of Slope Compensation	47
4.5.2Segment Slope Compensation.....	51
4.5.3Slope Compensation Simulation Results	52
4.6CLK and Ramp Generator	53
4.6.1CLK and Ramp Generator Principle.....	53
4.6.2CLK and Ramp Generator Simulation.....	55

4.7Peak Current Sense Block.....	57
4.7.1 Peak Current Sense Principle.....	57
4.7.2 Peak Current Sense Simulation.....	59
4.8Soft Start	61
4.9 PWM Logic Control	64
4.10TOP Simulation.....	66
4.10.1Heavy Load Simulation.....	67
4.10.2Light Load Simulation.....	70
4.10.3Step Response Simulation	72
Chapter5 Process Layout Package and Test	75
5.1Wafer Process	75
5.2 Package	76
5.3Layout Design.....	77
5.3.1 Layout describtion	77
5.3.2The Layout Top	78
5.4Chip Test	78
5.4.1Test Result.....	81
Conclusion	87
Reference	88
Publication.....	92
Acknowledgement	93

第一章 绪论

1.1 现代集成电路的发展

现代半导体技术的兴起和发展，促生了各种电子产品和移动通讯终端。早期的电报机、电话以及无线电等电子仪器的主要组成部件是真空管，真空管的缺点是在其在工程中体积庞大，工作可靠性低；在工作时消耗大量电能，由于效率低，又释放了大量的热量^[1-4]。电子业的发展一直受到真空管这些缺点的制约，直到1947年在贝尔实验室由威廉·肖克利、约翰·巴丁和沃特·布拉顿发明后历史上第一个晶体管^[5-8]后才得到解决，晶体管具有小体积、高可靠性、低功耗，效率高^[9-12]等特点。晶体管的优点使得工程师们可以设计具有更多复杂功能的电路，这些电路可能是由成千上万晶体管组成的；但是要将众多的细小的晶体管焊接成一个具有复杂功能的复杂电路，其工作量必定是十分惊人的，这在工程中会耗费大量的人力和时间。这种困境在美国军方一个名为 Micro-Module program^[13-15]的项目的完成后得到极大的改善。Micro-Module program 由如今全球著名的德克萨斯州仪器（TI）承担，1958年 Jack Kilby 加入了 Micro-Module program 后项目取得了突破性的进展；1958年7月 Jack Kilby 开始尝试使用半导体制作集成电路，到该年的9月12日，Jack Kilby 成功的在一块锗片制作了一个简单的振荡电路，这就是历史上的第一块集成电路^{[8][16]}，这在集成电路史上具有里程碑式的意义，从此电子业进入了一个全新的领域。

1959年，英特尔(Intel)的始创人金·赫尔尼和罗伯特·诺耶斯在仙童半导体公司开发出一种新的平面技术^{[8][17-18]}，这种技术使得人们能够在硅表面铺上不同的材料来制作晶体管，同时在晶体管连接处覆盖一层氧化物作保护。平面技术上突破取代了手工焊接晶体管的复杂工作，同时用硅取代了锗，这极大的降低了集成电路的生产成本，使得集成电路产品化并投入市场成为可能。1960年，贝尔实验室的约翰·艾特拉和道旺·卡恩研发了第一个金属氧化物半导体（MOS）绝缘栅场效应晶体管^[19-20]。1963年，仙童半导体实验室的弗兰克·哈里森的论文提到了互补金属氧化物半导体晶体管^[21-24]，也就是 CMOS 的发明，CMOS 的低功耗得到了人们的认可，这为低功耗集成电路打下了基础，并成为今天主流数字集成电

路的生产技术，到了 1964 年，第一块商用 MOS 集成电路在通用微电子有限公司诞生^[25-26]，从此，由集成电路制成的电子仪器设备席卷整个行业，到二十世纪 60 年代末期，约 90% 的电子产品是以硅集成电路为基础的。自 1961 年起，世界电子业市场总市值由 29 亿美元增长至今时今日仅英特尔就高达 1067 亿美元^[27]。

1.2 电源管理 IC 的发展

集成电路的发展为电子信息带来革命，他被广泛的应用于现代通信、航空航天、生物技术、医疗器具、汽车、军事以及计算机等高科技领域。随着集成电路技术的发展，为集成电路电子产品供电开始成为问题，由于大多电子产品是由电池供电的，早期的电子产品，为其供电的电池几乎占到电子产品体积和重量的三分之二，且电池的直流电压是没有经调整的，所以不能满足电子设备中不同电路对电源电压的要求^[28-29]，在这种情况下，利用集成电路技术的电源管理集成电路则应运而生。电源管理 IC 进一步使电子产品的体积和重量都大大减小。如今，体积更小，更轻便的电子终端，诸如移动电话，MP3，数码相机等已经改变了这个世界人们的生活方式，这在很大程度上都要归功于集成电路技术及电源管理技术的发展。

众所周知，各种电子设备中的电源的主要任务就是为电子设备中的各种电路提供电能。为便携式电子终端提供电能的主要是电池，所以电源管理 IC 的主要功能就是直流变换。一般情况下，直流变换 IC 的输入为一个未经过调整的直流电压，如电池的输出，经过直流变换器的转换后可输出与输入大小不同或者极性相反的经过调整的直流电压，以满足电子终端的需要^[30]。

电池通过电源管理 IC 为电子终端的电路供电，如图 1.1 所示。在生活 and 科学应用中的电子设备都包含有多个各种各样具有不同功能的子电路，而每一个子电路又都有不同电源电压需求（高于或低于电子设备电，有时甚至是极性相反的），因此对电源管理 IC 的噪声，功率，输入输出电压，输出纹波，效率以及电路结构等指标有不同的要求。

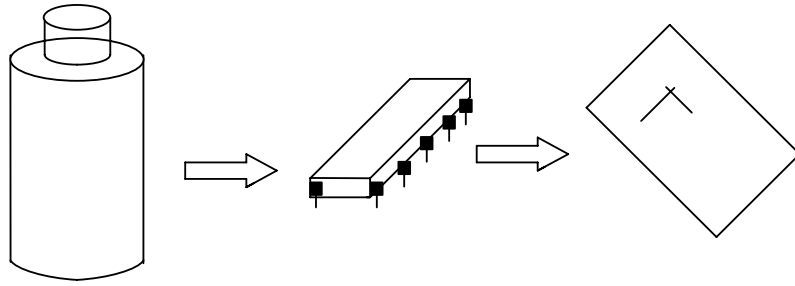


图 1.1 电源管理 IC 与电源和电路的关系

目前常用的直流变换电源管理芯片主要有线性电源和开关电源两大类,如图 1.1 所示。线性稳压电源相对于开关电源,稳压性能好,输出稳定,结构简单,应用方便,需要很少的外围电路,非常适用于对于噪声敏感的低压模拟集成电路和射频电路;但线性稳压电路只能输出比输入更低的电压,输出压差较大时,如果负载需要大的驱动电流,线性稳压电源在工作时功率开关一直是处于导通状

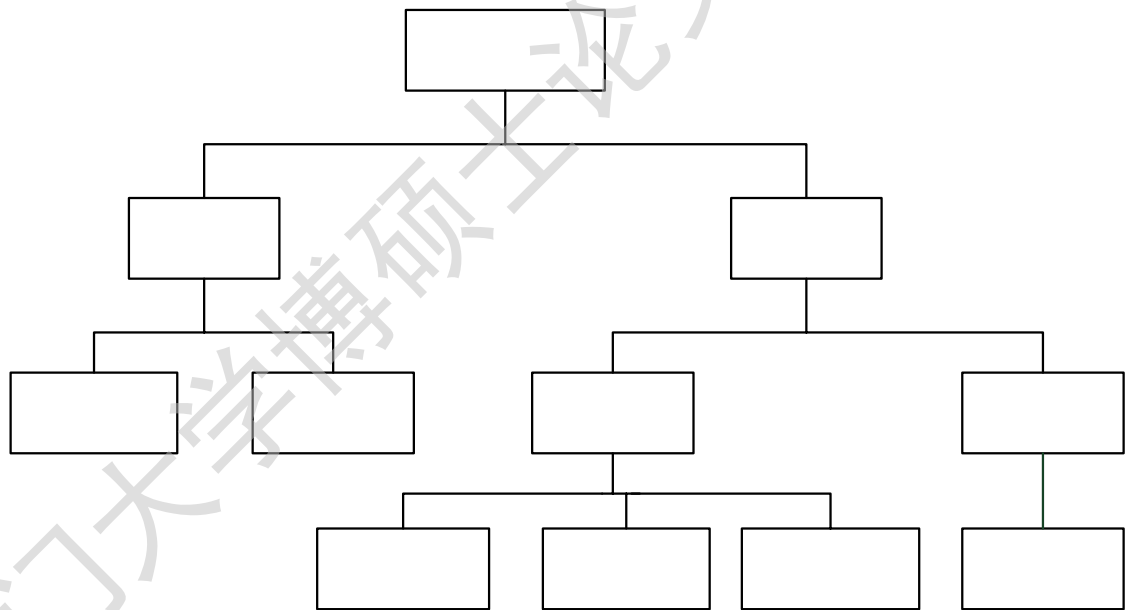


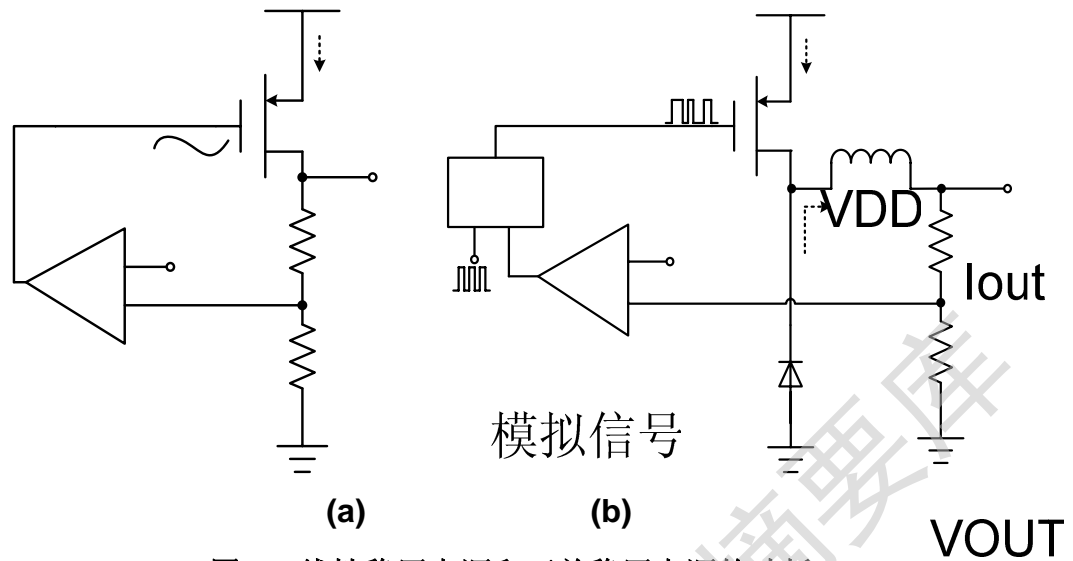
图 1.2: 直流稳压电源分类

态,本身的功耗将会增加,则效率将会大大降低,因而使用线性稳压电源将会使电池的寿命不能得到有效地延长。经典的线性稳压器如 LDO,如图 1.3(a)所示,其在功率管上的功耗是功率管电阻与输出电流之积。

七十年代以来,开关变换器在理论分析方法上取得了诸多的进展,如 G.W. 韦斯特对脉冲宽度调制型 DC-DC 开关变换器进行建模分析的电路平均法,他从变换器的电路出发,对电路中的非线性开关元件进行平均和线性化处理,得到几类变转器连续导通模式的等效电路。R.G.米德布鲁克和 S.cuk 提出著名的状态空

间平均法^[31-32]，至今仍然发挥重大作用^[33-34]。这种方法是从 PWM 型 DC-DC 开关变换器的各个拓扑的状态方程出发，通过利用开关占空比加权对时间进行平均处理而得到统一的状态方程，再经小信号扰动和线性化处理得到统一的等效电路模型。这种方法简化电路的设计思想，对后来的研究影响深远。当前 DC-DC 开关变换器的研究热点之一电路的建模和控制方法分析研究。开关电源在结构上由于集成了控制 IC，所以相对线性稳压电源要复杂的多，且在工作时功率管是处于开关状态的，这将引入电磁干扰（EMI）问题，同时其输出的纹波相对于线性稳压器要大；但是开关电源的结构丰富，其输出电压可以高于、也可以低于输入电压，极性甚至也可以是相反的，体积更小，重量更轻，工作时由于功率管处于开关状态，所以自身功耗相对于线性稳压器将大大降低，提高了效率，可以延长电池的使用寿命，与线性稳压器相比，应用范围更广，同时性价比也较高。一个典型的开关电源（BUCK）的工作原理如图 1.3(b)所示，其功耗为开关在导通时的电阻与电流之积。

由于开关电源内部的功率器件工作在高频开关状态，本身消耗的能量很低，电源效率比普通性能稳压电源提高近一倍。其中，小功率的开关电源芯片是一种正在快速发展的功率集成电路，由于其体积小，转换效率高(70%-90%)，因而具有很好的市场前景和研究价值。我国电源管理产业近年来发展较快，一些 IC 设计企业的设计水平已经取得了长足的进步，在技术上已达到较高的水平，但是在正向设计的经验，技术高度和复杂度以及芯片的制造工艺等方面还远远落后于国际领先企业，诸如 MAXIM IC，Texas Instruments，ST microelectronics 等公司，目前的市场欧美发达国家公司的开关式电源产品仍然是主导，他们仍然是技术和创新的引领者。



1.3 本文的研究背景和意义

综合国内外的研究现状，为了满足人们生活及科技活动各领域的需求，开关电源的发展和研究将主要集中在降低芯片功耗，提高芯片效率，降低芯片噪声和纹波，提高芯片抗干扰能力，提高芯片集成度及增加芯片的综合功能上。当前全球处于能源紧张情况下，所以低功耗，高效率的开关电源芯片显然更受市场和科技应用领域的青睐，因而如同步整流技术、软开关技术、软启动电路、低电源电压低功耗待机式、远程关断式、轻载时自动降低开关频率技术等低功耗技术受到了整个行业的关注^[35]。开关电源的一个显著不足就是噪声和纹波较大，由于开关电源的功率管工作在开关状态，以及电路中续流二极管的存在，会给开关电路引入反向恢复时间噪声，开关管谐波噪声，交流输入回路噪声^[35]；同时输出纹波也较大，因此，如何抑制噪声，减小纹波将会引起更多设计和研究人员的关注。随着半导体工艺水平的提高，使得将更多复杂电路集成在一起成为可能，通用型的数字 IC 的生产工艺已经进入了纳米时代，而诸如电源管理，音频放大器，LED 驱动等数模混合型 IC 的工艺也已经达到了深亚微米的水平，这使得集成度大大提高，在同一块芯片上实现多种综合功能已是现实。电源管理 IC 一般是小规模为数模混合型集成电路，其开发周期较短，且成本相对于大规模及超大规模的集成电路也较低，如果能在一片 IC 上集成多种功能，将进一步降低开发成本，且提高了专用型芯片的通用性，因而具有非常现实的意义。

1.4 本课题的主要工作介绍

本课题是厦门某 IC 公司面向市场主要是手机应用而研究开发的一款具有高效率、低功耗 PWM 升压型电流模 DC-DC 变换器，芯片的固定频率设计为 1MHz。本文设计的 DC-DC 变换器的工作电路如图 1.4 所示，芯片只需要很少的外围电路，对 PCB 板的面积要求非常小。针对该芯片的功能参数要求，本文的工作主要集中在以下几个方面：

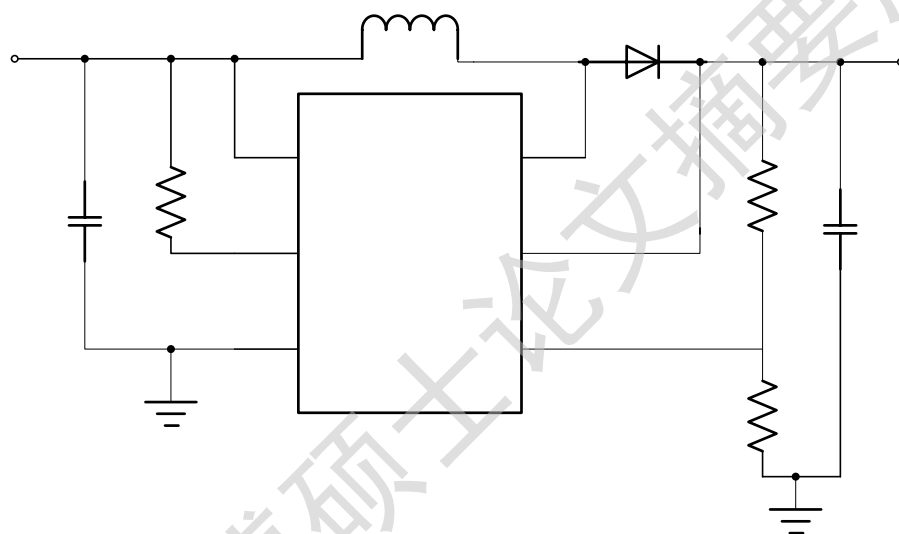


图 1.4：芯片应用电路

介绍了开关电源及其调制方式基础知识，分析了开关电源中经典的 buck，boost，buck-boost，cuk 结构及其工作原理，同时介绍了开关电源的经典调制方式（PWM 和 PFM），根据设计需求，着重介绍了 PWM 调制方式的电流模升压型开关电源的工作原理。设计了芯片的所有主要电路，由于开关电源在 PWM 调制方式时，在开关的占空比大于 50%时具有的开环不稳定的特性，本文采用了相对于传统斜波补偿的分段斜波补偿技术使其稳定的同时，增加了芯片的带载能力，采用了新的 sense 电流方式，进一步降低了功耗，效率高达 90%。芯片自身集成了过温、过压保护功能。对芯片的各个独立电路及整个系统进行了详细的分析及仿真验证；完成了芯片版图的设计及后端生产测试等工作。考虑到芯片是面向市场的，其成本将是决定产品是否具有市场竞争力的一个重要方面，在保证芯片各项参数能达到设计要求的前提下，综合考虑芯片晶圆工艺和封装工艺成本，以期获得最大的利润。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库